

El principio y el fin del Universo

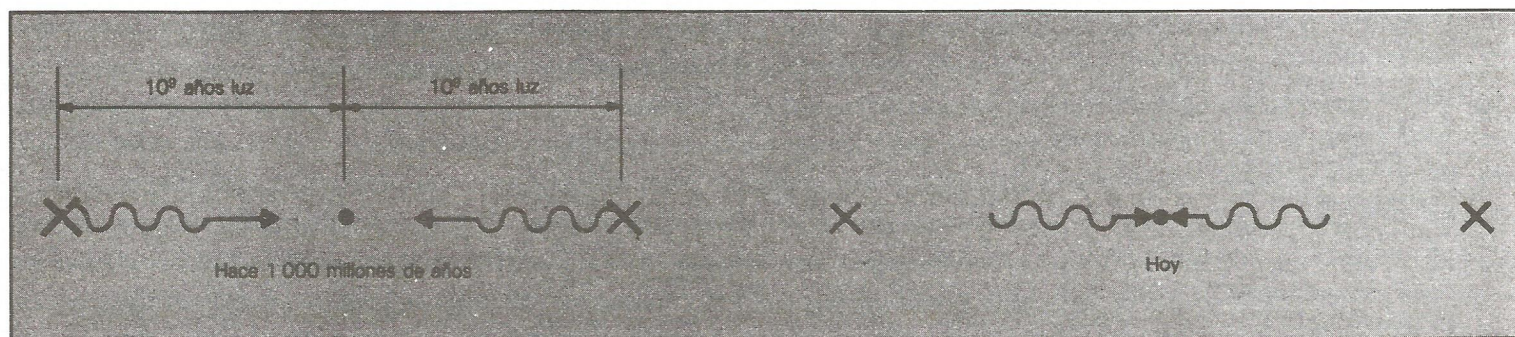
Sexta parte: el Universo inflacionario

por Christine Allen y Miguel Angel Herrera

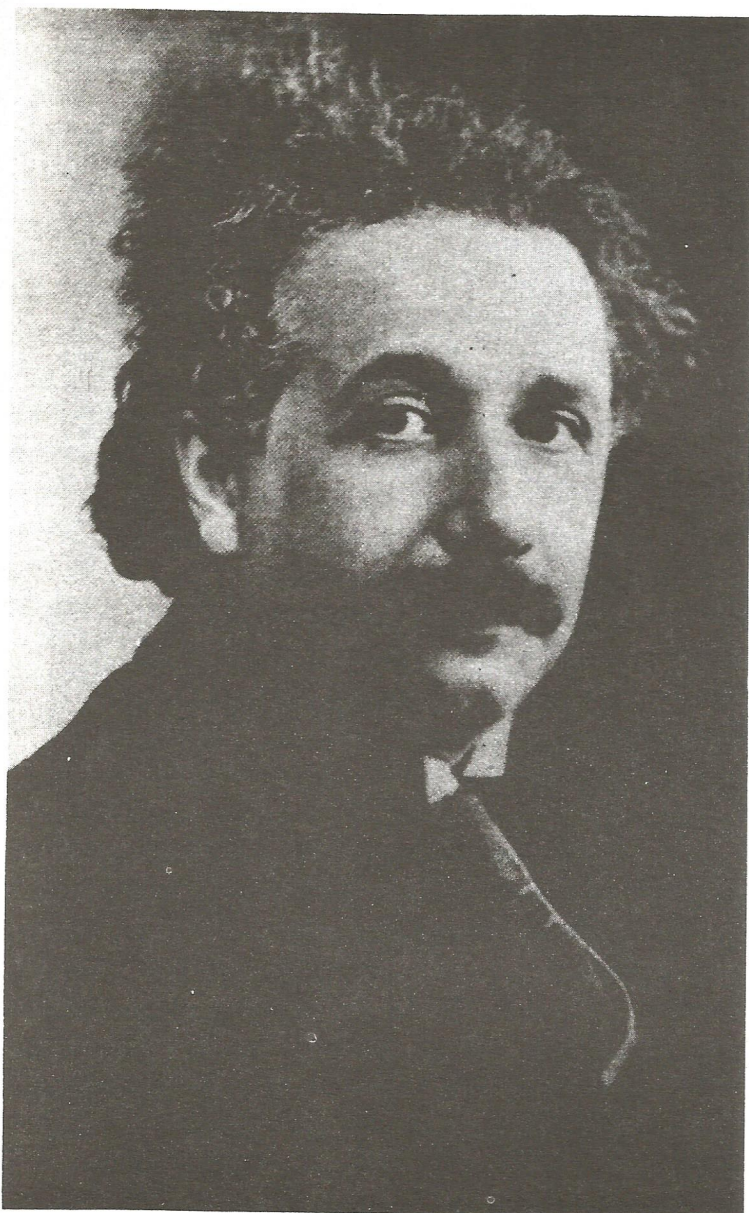
Hacia fines de la década de los setenta, los cosmólogos habían logrado esbozar un panorama de la evolución del Universo que, en términos generales, resultaba convincente. Este esquema –que los cosmólogos actuales denominan “modelos estándar”– representaba la culminación de un agitado periodo de investigación, durante el cual se había logrado incorporar las ideas más avanzadas de la física de las partículas elementales (Teorías de Gran Unificación o GUTS) al modelo ya clásico de la Gran Explosión (*Big Bang*). La imagen que se había logrado integrar era la de un Universo que evolucionaba esencialmente a través de una serie de transiciones de fase (o “congelaciones”, como las hemos llamado en artículos anteriores) a partir de un estado inicial increíblemente caliente y condensado, además de totalmente simétrico (esto es, con el mismo número de partícu-

las que de antipartículas). En el instante inicial, las cuatro fuerzas de la naturaleza (la gravitación, la electromagnética, la fuerte y la débil) estaban unificadas o “fundidas” en una sola interacción universal. Pero con el paso del tiempo, la expansión del Universo –y el consiguiente descenso de la temperatura– provocó una especie de congelación fraccionada, durante la cual las cuatro fuerzas fueron “congelándose” una a una, separándose de las demás.

Pero esto es sólo parte de la historia. En forma paralela a la congelación de las fuerzas estaba ocurriendo también una serie de “congelaciones” de las partículas: una de ellas –la de las partículas X– tuvo el importantísimo resultado de eliminar la simetría materia-antimateria, puesto que generó un mayor número de quarks que de antiquarks; poco después, la congelación de los quarks en bariones dio origen a la ma-

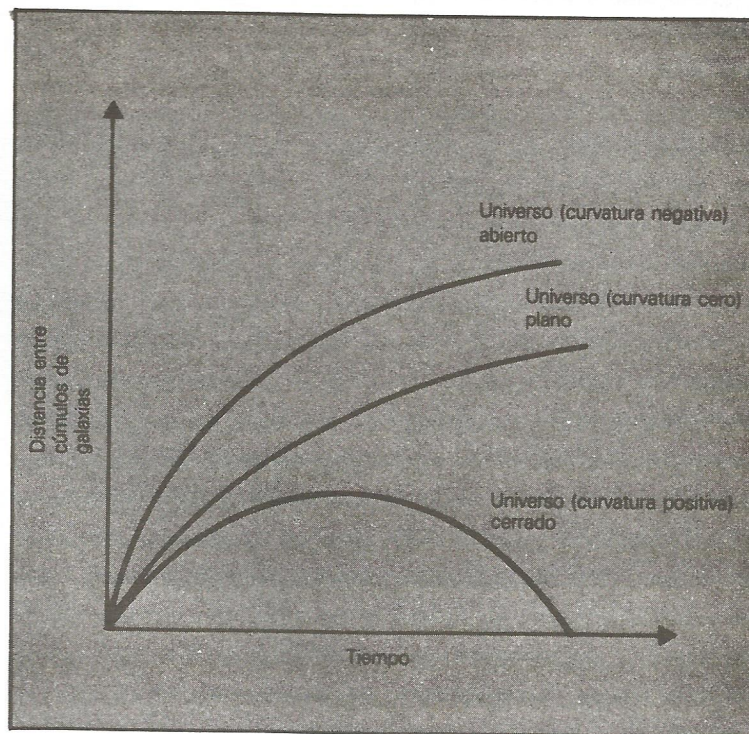


La radiación emitida hace mil millones de años por regiones del Universo a mil millones de años luz de nosotros nos está llegando en este momento. El “problema de la isotropía” consiste en que esta radiación “de fondo” es prácticamente la misma en todas direcciones a pesar de que las regiones que la emitieron estaban causalmente desconectadas (y siguen estando, por cierto) cuando lo hicieron.



El esquema teórico que describe el comportamiento dinámico del Universo es la Teoría General de la Relatividad, enunciada por Einstein en 1915

teria que conocemos en la actualidad. ¡Y todo ello sucedía antes de que el Universo hubiera completado su primer milisegundo de vida! Una vez transcurrido este lapso, comenzamos a pisar un terreno más explorado y conocido; la GUTS y demás teorías exóticas sobre lo que ocurre cuando las energías son extremadamente altas dejan de ser determinantes para la evolución del Universo; el resto de su historia puede escribirse –al menos en principio– en términos de leyes físicas más conocidas y confiables. Según vimos en el segundo artículo de esta serie, todo parece indicar que antes de que hayan transcurrido los primeros tres minutos, las reacciones nucleares generan una cantidad apreciable de helio, así como trazas de algunos elementos más pesados. Varios centenares de miles de años después, la materia se congrega en estrellas y galaxias, dejando como únicas evidencias del remotísimo pasado la expansión misma y una especie de “calorcito” que



De acuerdo con la Teoría General de la Relatividad, nuestro Universo puede tener curvatura positiva, negativa o cero. El “problema de la curvatura” consiste en que su curvatura “real”, sea cual fuere, es muy cercana a cero

se percibe por doquier, y que se conoce como la radiación de fondo.

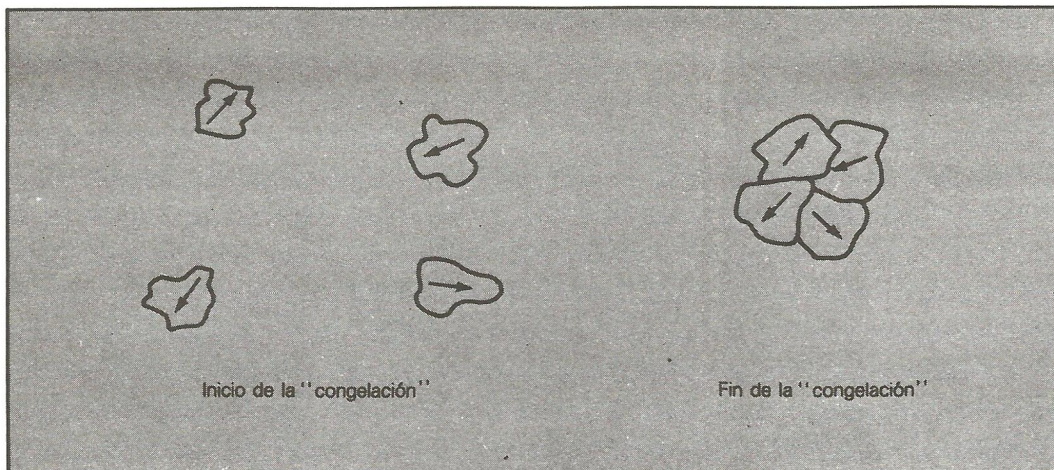
Los problemas del modelo estándar

El esquema que acabamos de resumir representa, sin duda, un logro sensacional, pues explica una gran cantidad de datos observacionales. Pero como dice el dicho, “nada es perfecto en esta vida”, y la cosmología no podía ser la excepción. Para decirlo en pocas palabras, el modelo estándar tiene problemas, pues no puede explicar algunos hechos observacionales bien establecidos. Los tres más sencillos de entender son: la isotropía de la radiación de fondo, la pequeñísima curvatura del Universo visible, y la ausencia de monopolos magnéticos. Veamos en qué consiste cada uno de ellos.

El problema de la isotropía

La radiación de fondo de 2.7 grados Kelvin, descubierta por Penzias y Wilson en 1965 (véase *Ciencia y Desarrollo* número 83), es una de las pruebas más contundentes de la teoría de la Gran Explosión, la cual predice la existencia de esta radiación como un “residuo” o “fósil” de las enormes temperaturas características de las primeras fases de la evolución del Universo. Es tan grande la importancia de esta radiación que a poco de anunciarse su descubrimiento ya había decenas de radiotelescopios escudriñando el cielo en todas direcciones, con el propósito de confirmar su existencia y de estudiarla más a fondo.

Pronto se hizo evidente que la radiación fósil posee un

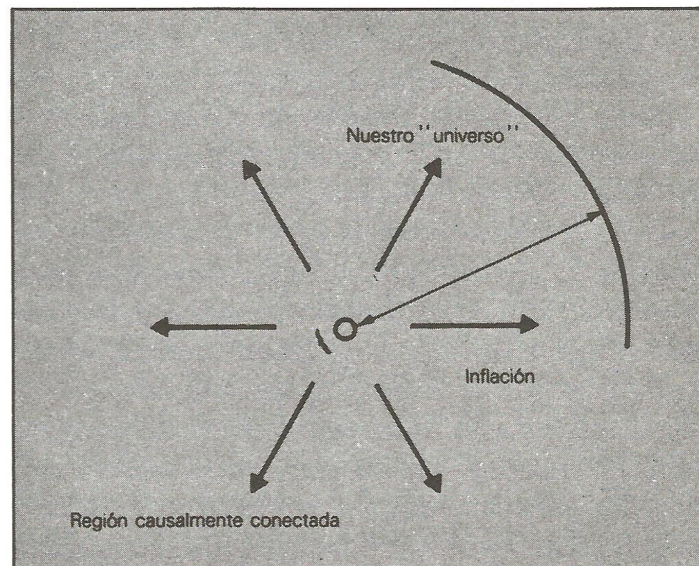


La "congelación" Guts debe haberse iniciado simultáneamente en muchos puntos del espacio con orientaciones diferentes del campo de Higgs en cada uno de ellos. Las fronteras bidimensionales, unidimensionales y "cerodimensionales" entre regiones con diferente orientación constituyen "defectos" en el espacio-tiempo

alto grado de isotropía, esto es, que el flujo de energía que nos llega es prácticamente el mismo desde cualquier dirección (la máxima desviación detectada hasta ahora es de una parte en diez mil). Este resultado parece lógico a primera vista, pues a final de cuentas, ¿por qué habría de estar más caliente una región del Universo que otra? Pero si lo pensamos un poco más vemos que no es así.

Para entender cuál es el problema, supongamos (sólo con fines ilustrativos) que la radiación que en este momento nos llega proviene de regiones del Universo que se encontraban a unos 1 000 millones de años luz de nosotros cuando la emitieron. De ser así, la radiación que ahora recibimos de cierta dirección —digamos, de la "derecha"— inició su viaje hacia nosotros hace 1 000 millones de años (puesto que la radiación viaja a la velocidad de la luz), y la que recibimos de la dirección opuesta —de la "izquierda"— inició su viaje también hace 1 000 millones de años. Es obvio que la separación entre la región de la "derecha" y de la "izquierda" era de 2 000 millones de años luz en el momento en que emitieron esta radiación, de manera que en los 1 000 millones de años que han transcurrido desde entonces ninguna señal procedente de una de ellas ha podido llegar a la otra (recuérdese que la máxima velocidad a la que puede viajar una señal es la velocidad de la luz). Puede decirse que las dos regiones en cuestión están causalmente desconectadas, lo que significa que están tan alejadas entre sí que ninguna de ellas ha tenido tiempo siquiera de enterarse de que la otra existe, por así decirlo. Y en ello estriba, precisamente, el problema. ¿Cómo es posible que dos regiones, cada una de las cuales no sabe siquiera que la otra existe, tengan exactamente la misma temperatura, con una precisión de una parte en diez mil?

Podríamos pensar que una manera posible de resolver la cuestión sería suponer que en el pasado ambas regiones estuvieron lo suficientemente cerca una de la otra como para que se lograra establecer entre ellas el equilibrio térmico, y que después se alejaron debido a la expansión del Universo, conservando memoria de la situación pasada. Pero, por desgracia, los cálculos indican que esto no pudo suceder, al menos dentro del marco del modelo estándar: puede demostrarse que dos regiones causalmente desconectadas en un momento dado lo han estado también en todos los momentos anterior-



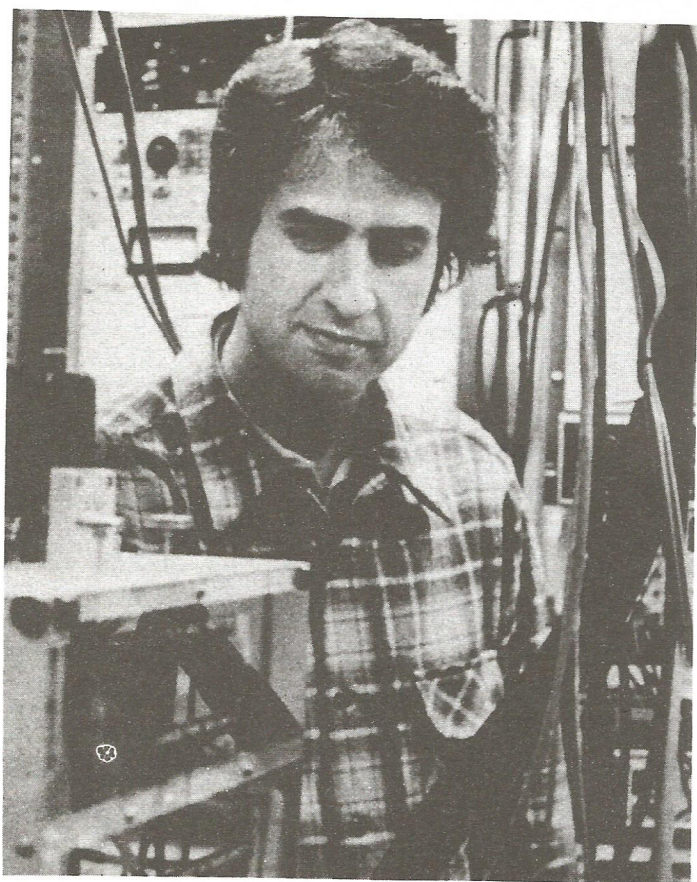
De acuerdo con las Guts, un "defecto cerodimensional" es un monopolio magnético. El "problema de los monopolos" consiste en que deberían observarse muchos de ellos y, hasta la fecha, no se ha detectado ninguno con certeza

res. En síntesis, el problema que plantea la isotropía observada de la radiación fósil no puede resolverse dentro del esquema estándar.

El problema de la curvatura

Un aspecto teórico de la cosmología que no hemos tocado en esta serie de artículos (en parte porque es más conocido y en parte por evitarle al lector digresiones geométricas) es el de la curvatura del Universo. Ha llegado el momento, sin embargo, de decir unas cuantas palabras al respecto, así sea sólo con el fin de hacer comprensible otra de las fallas del modelo estándar.

Hemos ya mencionado que a escala cósmica la fuerza dominante, la que determina la dinámica del Universo, es la gravedad; ahora bien, la mejor descripción de los fenómenos



En 1982, Blas Cabrera, de la Universidad de Stanford, anunció que un aparato de su laboratorio había registrado un fenómeno cuya única explicación era el peso de un monopolio magnético a través de él. Hasta la fecha, el suceso no se ha repetido

gravitatorios con la que contamos hasta la fecha es la Teoría General de la Relatividad, formulada por Einstein en 1915. En consecuencia, la evolución dinámica del Universo suele describirse por medio de las ecuaciones de esta teoría. De acuerdo con ellas, sólo hay tres tipos de Universo posibles en lo que se refiere a su comportamiento dinámico: el Universo elíptico, el parabólico y el hiperbólico. El primero se caracteriza porque, después de cierto tiempo finito, la expansión se detiene y se invierte, convirtiéndose en contracción; en el segundo, la expansión también se detiene, pero tarda un tiempo infinito en hacerlo; en el tercero, en cambio, la expansión no se detiene nunca, ni siquiera después de un tiempo infinito. Los nombres se derivan de la manera como varía la distancia entre cualquier par de puntos cercanos durante la evolución de un Universo: en el elíptico, esta distancia crece durante la expansión hasta un valor máximo; después decrece durante la contracción, hasta llegar otra vez a cero. Así, la distancia entre dos puntos se comporta ni más ni menos como la de los puntos de la mitad superior de una elipse respecto de su eje horizontal. En el Universo parabólico, la distancia crece sin cesar, de la misma manera que los puntos de una parábola se alejan cada vez más de su vértice. En el Universo hiperbólico, la distancia también crece sin cesar, pero ahora de manera que los puntos en cada rama de una hipérbola se alejan del vértice correspondiente.

Debido a lo anterior, cada uno de los tres tipos de Universo puede caracterizarse por una excentricidad, aquélla que corresponde a la curva respectiva: el Universo elíptico tiene una excentricidad menor que uno; el parabólico, igual a uno, y el hiperbólico, mayor que uno. El punto importante para nuestros propósitos es destacar que puede haber un número infinito de Universos elípticos y un número infinito de Universos hiperbólicos (pues hay una infinidad de números menores o mayores que uno); en cambio, para que un Universo sea parabólico, su excentricidad tiene que ser exactamente igual a uno. Regresaremos a esta cuestión un poco más adelante.

La exposición anterior fue únicamente matemática. Veamos ahora cómo podemos entender la existencia de los tres tipos de Universo desde un punto de vista físico. Dijimos antes que la fuerza de gravedad es la responsable del comportamiento dinámico del Universo; y así es, en efecto, porque es la gravedad la que determina si la expansión llega a un fin o si sigue para siempre. En un Universo con mucha masa, la expansión termina por detenerse, debido a que la extracción gravitatoria entre sus componentes es más intensa que la energía de la expansión; en un Universo con poca masa, en cambio, la atracción no es suficiente para vencer la expansión. En síntesis, un Universo será elíptico, parabólico

En 1981, Alan Guth inventó el modelo inflacionario del Universo para explicar los problemas de la isotropía, la curvatura y los monopolos magnéticos

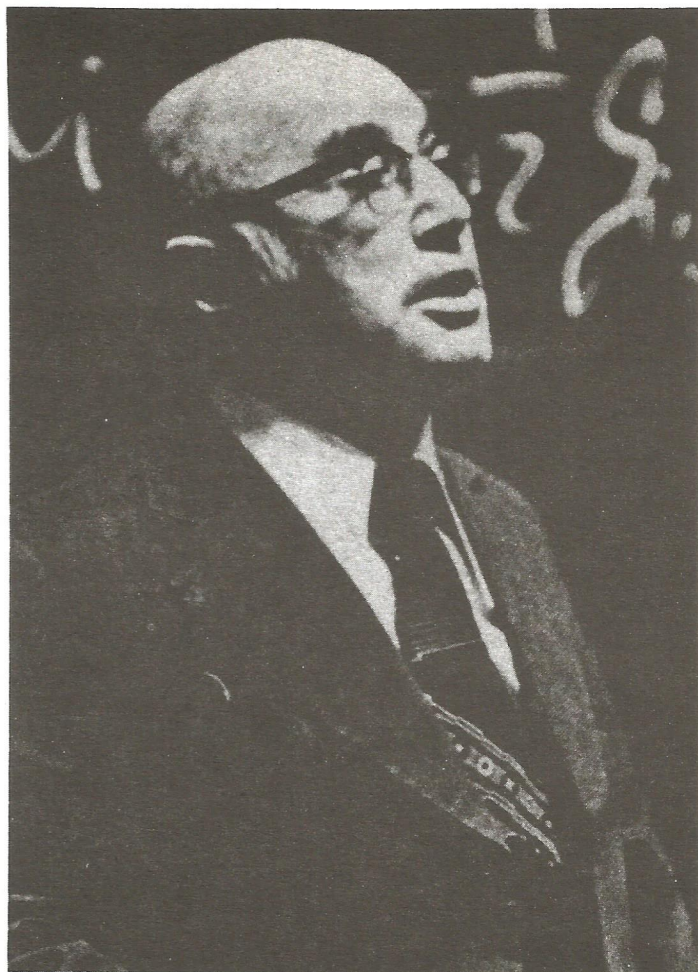


o hiperbólico según sea la relación entre la masa que contiene y su energía de expansión. En términos un poco más técnicos, para cada velocidad de expansión existe cierta densidad —llamada densidad crítica— tal que si la densidad real es mayor que ella, el Universo será elíptico, si es igual a ella, será parabólico, y si es menor, será hiperbólico.

Y así llegamos, por fin, a la célebre curvatura. De acuerdo con la Teoría de la Relatividad General, la materia tiene la propiedad de curvar el espacio, y hay tres tipos de curvatura: positiva, negativa o cero, que corresponden a Universos elíptico, hiperbólico y parabólico, respectivamente. Estos tres tipos de curvatura corresponden a los tres tipos de Universo que hemos mencionado, y están determinados por la cantidad de materia que contienen: un Universo elíptico, es decir, con mucha masa, tiene una curvatura positiva; uno hiperbólico, con poca masa, tiene curvatura negativa, y uno parabólico tiene curvatura exactamente igual a cero. Si ahora regresamos a lo que vimos en el párrafo anterior, es claro que un Universo parabólico es un caso muy especial: su excentricidad es exactamente igual a uno y su curvatura exactamente igual a cero (por supuesto estas dos propiedades no son independientes). Y en ello consiste precisamente el problema de la curvatura: todo parece indicar que nuestro Universo es parabólico (o bien está muy cerca de serlo). Surge de inmediato la pregunta, ¿por qué, teniendo infinitas posibilidades de ser elíptico o hiperbólico, el Universo escogió la más difícil, esto es, ser parabólico? En ello estriba justo el problema de la curvatura.

El problema de la ausencia de monopolos magnéticos

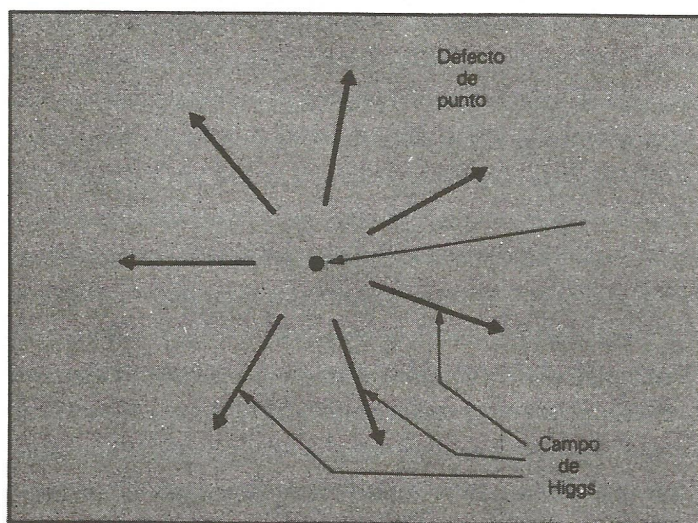
Todos sabemos que los imanes tienen siempre dos polos, un polo norte y un polo sur, los cuales en un imán de barra se



El físico soviético Yakov Zel'dovich propuso un modelo semejante al de Guth en la década de los setenta

localizan en los extremos de la barra; todos sabemos también que si partimos la barra a la mitad, no obtenemos un polo norte y un polo sur aislados, sino dos nuevos imanes (más pequeños, desde luego, pero tan imanes como el original), cada uno de los cuales con su propio polo norte y polo sur. Este comportamiento es tan conocido que durante muchos siglos sólo a algunos científicos despistados se les ocurrió preguntarse ¿por qué no es posible obtener polos norte o polos sur aislados? Un polo aislado, un objeto que tuviera sólo una carga magnética (norte o sur) sería, precisamente, un monopol magnético.

La cuestión adquirió cierta relevancia cuando J. C. Maxwell unificó las leyes de la electricidad y el magnetismo, pues los físicos, guiados como tantas otras veces por la idea de la simetría en la naturaleza, notaron de inmediato que esa supuesta simetría no se cumplía en el caso del electromagnetismo. Si la electricidad y el magnetismo eran, en esencia, el mismo fenómeno, ¿por qué existen cargas eléctricas aisladas y no se observan cargas magnéticas aisladas? La respuesta se hizo esperar muchos años. Un avance importante ocurrido en 1931, cuando P. A. M. Dirac demostró que si existiera un solo monopol magnético, podría explicarse el hecho (éste sí observado) de que la carga eléctrica está cuantizada; a partir de entonces, teóricos y experimentales se han ocupado del asunto, los primeros, tratando de explicar la razón por la cual no se observan los monopolos magnéticos, y los segundos, intentando encontrar así fuese uno de ellos.



El modelo inflacionario consiste, esencialmente, en suponer que la región del Universo en que vivimos sufrió en el pasado, durante un brevísimo intervalo de tiempo, una expansión exageradísima. En consecuencia, todo lo que alcanzamos a ver no sería más que una parte pequeñísima de un pedacito tan pequeño del Universo que estaba causalmente conectado antes de la "inflación"

El interés se acrecentó cuando varios científicos demostraron que las teorías de Gran Unificación predecían, inevitablemente, la creación de monopolos magnéticos durante la “congelación” de la fuerza fuerte en las fases tempranas del Universo, y llegó a su clímax con el anuncio, por parte del físico estadounidense Blas Cabrera, de la observación de un monopolo. Ello ocurrió a la 1:45 de la tarde del 14 de febrero (día de la amistad) de 1982, cuando no había nadie en el laboratorio; para colmo, el aparato que detectó el monopolo había sido construido con otros fines. Por desgracia, a pesar de los esfuerzos del mismo Cabrera y de otros “cazamonopolos”, no ha habido ninguna otra detección hasta la fecha, de manera que, a pesar de la precisión de las mediciones de Cabrera y de la falta de explicaciones alternativas a su observación, no se ha aceptado como segura la detección original.

Pero, ¿a qué se debe que aparezcan monopolos magnéticos durante la congelación según las GUTS? Una analogía que refleja aproximadamente –como toda analogía– lo que ocurre es la siguiente. Pensemos en una masa de agua de dimensiones apreciables que se congela; no toda ella se convierte en hielo súbitamente. Por el contrario, comienzan a formarse centros de congelación en muchas partes de la superficie, los cuales van creciendo poco a poco, conforme la masa va congelándose. De vez en cuando dos o más de ellos entran en contacto, debido a su crecimiento, y se “funden” en masas de hielo más grandes; el proceso continúa hasta que toda la masa se ha congelado. Si, una vez concluida la congelación, examinamos con cuidado el hielo, veremos que no es perfectamente homogéneo, sino que es un “agregado” de varias regiones que se distinguen por la dirección en que están orientados los cristales individuales que las constituyen. En otras palabras, todos los cristales de una región dada es-

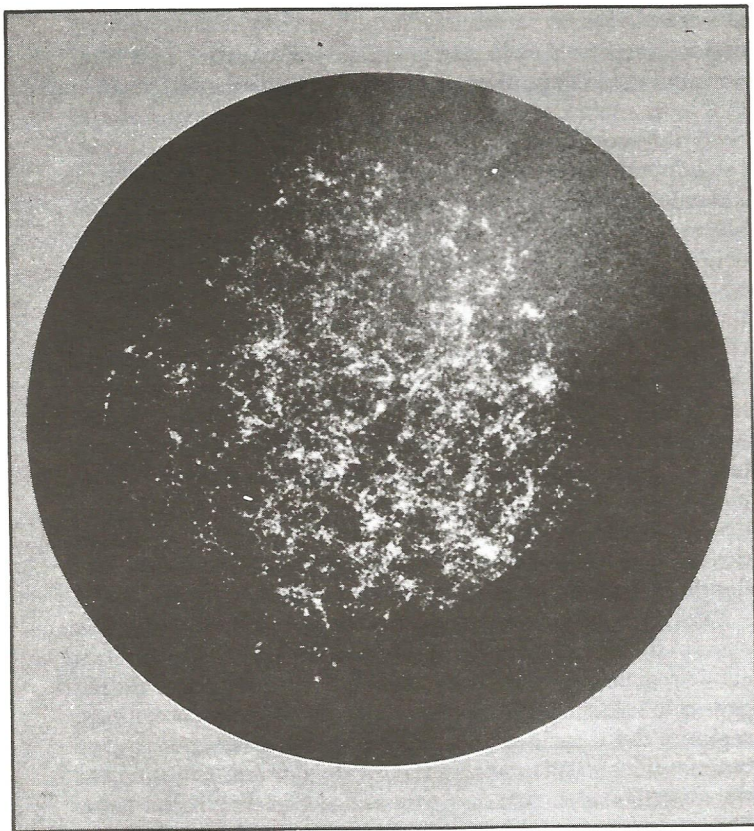
tán orientados en la misma dirección, pero ésta cambia de región a región y es lo que permite distinguirlas. Este comportamiento refleja, simplemente, el hecho de que la congelación se inició en varios lugares al mismo tiempo; en cada centro de congelación, los primeros cristales que se formaron adoptaron –totalmente al azar– una cierta orientación, y todos los cristales que se formaron a su alrededor se vieron obligados a seguirla. Cada centro mantuvo su orientación original durante su crecimiento y sus fusiones con otros centros, y fue esto lo que causó la heterogeneidad de la masa final (al menos en lo que se refiere a las orientaciones de los cristales). Una consecuencia de esta manera de congelarse –que es característica de los líquidos– es la formación de defectos a lo largo de las uniones entre diferentes regiones. Aquí, la palabra “defecto” significa “zona donde cambia súbitamente la orientación”. Es claro que puede haber tres tipos de defectos: 1) bidimensionales, donde se unen las paredes de dos regiones; 2) unidimensionales, donde se cortan dos defectos bidimensionales, y 3) “cerodimensionales”, donde se cortan dos defectos unidimensionales.

Pues bien, algo muy semejante es lo que se supone que ocurrió durante la congelación según las GUTS. De acuerdo con la teoría, existe un cierto campo –llamado campo de Higgs– que se “congeló” en diferentes direcciones en distintas regiones del espacio físico, y dio así lugar a defectos, ya sea bidimensionales (llamados paredes de dominio), unidimensionales (llamados cuerdas) o bien cerodimensionales. Estos últimos son puntos del espacio en los cuales el campo de Higgs cambia súbitamente de dirección al pasar “de un lado al otro” de ellos, lo que equivale a decir que el campo de Higgs “apunta radialmente hacia afuera” de ellos. Y esos puntos corresponden a los famosos monopolos magnéticos.

El problema que plantean los monopolos magnéticos es,

Si el modelo inflacionario es válido, todo lo que vemos no es más que un pequeñísimo pedacito de una pequeñísima región del Universo





En este mapa de más de un millón de galaxias, vemos claramente que el Universo ha evolucionado "de la misma manera" en todas direcciones; esto es, no se puede distinguir entre una región y otra. Según el modelo inflacionario para ver inhomogeneidades, tendríamos que alejarnos millones de millones de veces más que las galaxias más lejanas de este mapa

simplemente, que la teoría predice que debería haber muchos de ellos, tantos como defectos de punto se hayan formado durante la congelación prevista por las GUTS. Y... ¿dónde están ahora todos esos monopolos? Los cálculos indican que aun suponiendo que el hallazgo de Blas Cabrera haya sido real, el hecho de que no se haya vuelto a presentar otro implica que hay del orden de diez mil millones de veces menos monopolos que los predichos por las GUTS.

La solución moderna: inflación

Buscando una respuesta al problema de los monopolos fue como Alan Guth llegó, a principios de 1981, a la teoría del Universo inflacionario. La idea básica es, en realidad, muy sencilla. ¿Por qué suponer que el Universo se ha expandido siempre como lo vemos hacerlo ahora? ¿Qué pasaría si durante un corto intervalo de tiempo en el pasado del Universo se hubiera expandido mucho más rápido de lo que marca la teoría estándar? Guth se dio cuenta de que el resultado es que se resolvería el problema de los monopolos magnéticos (más tarde se percató de que también se aclararían los otros dos problemas del modelo estándar, aunque cuando inventó

su Universo inflacionario ni siquiera sabía de ellos). Veamos ahora cómo una expansión rapidísima en el pasado permite resolver los tres problemas.

Supongamos que en el momento de la congelación propuesta por las GUTS el Universo, por razones por ahora desconocidas, se expandió en forma exponencial durante un brevísimo periodo (del orden de 10^{-23} s), y que las dimensiones de una región dada del espacio aumentaron en un factor de, digamos, 1 040 cm. Ello implicaría que una región causalmente conectada, cuyas dimensiones en el momento inicial fueran de unos 10^{-23} cm, se "inflaría" hasta alcanzar dimensiones de 1 017 cm, en tan sólo 10^{-33} s. Ahora bien, la región del Universo que llegamos a observar hoy día (unos 15 000 millones de años luz) medía en el momento inicial alrededor de 10 cm (si suponemos que después de la fase inflacionaria la expansión volvió a la normalidad). Ello supone que todo lo que podemos ver hoy día no es más que una pequeñísima parte de toda una región que, en el pasado, estuvo causalmente conectada. Con esto se resolvería el problema de la isotropía, pues todo el Universo que hoy observamos correspondió en el pasado a una zona tan pequeña que no tuvo problemas para alcanzar el equilibrio térmico. También se resuelve el problema de la curvatura, pues la inmensa expansión sufrida por nuestra región del espacio la volvió prácticamente plana (es decir, con curvatura casi cero). Por cuanto al problema de los monopolos, todo lo que hoy vemos pertenecía y pertenece a la misma región, la cual no tiene por qué presentar defectos de unión con otras regiones. En otras palabras, el problema de los monopolos también se esfuma. En resumen, con una sola hipótesis nos desembarazamos de todos los problemas del modelo estándar. Es por ello que la teoría del Universo inflacionario alcanzó rápidamente una gran popularidad y sigue contando con el apoyo de la mayoría de los cosmólogos.

Nunca se ha aclarado si la situación mundial tuvo alguna influencia en la selección del adjetivo "inflacionario" por parte de Guth, quizá sugerido por la "solución" adoptada por muchos gobiernos ante sus problemas económicos; lo que sí se ha descubierto es que, como en el caso de muchas otras grandes ideas, Guth no fue el primero ni el único al que se le ocurrió. En efecto, Zeldóvich y Linde, en la década de los años setenta —y de manera independiente Kazanas y Sato, años más tarde— también habían propuesto soluciones semejantes a los problemas del modelo estándar. El mérito de Guth estriba en el hecho de que no sólo propuso la idea, sino que también la fundamentó teóricamente con un mecanismo plausible, emanado de las GUTS y capaz de producir la expansión observada. La física que interviene en el esquema de Guth es demasiado complicada para exponerla en el breve espacio que nos queda. Lo importante es recalcar que contamos, hoy por hoy, con un modelo cosmológico que permite explicar, en términos de leyes físicas bien conocidas y aceptadas, las características básicas del Universo en que vivimos: la expansión del Universo, la radiación de fondo, la asimetría materia-antimateria, la homogeneidad e isotropía que observamos a grandes escalas, la pequeñísima curvatura y la ausencia de monopolos magnéticos. Y eso es mucho más de lo que soñábamos lograr hace 60 años, cuando la cosmología pertenecía más bien al campo de la especulación que al de las ciencias exactas.